

# 1단 비례 압력제어밸브의 정특성 및 동특성 실험

## Static Characteristic and Dynamic Characteristic Experiment of First-stage Proportional Pressure Control Valve

정헌술 · 남지우 · 임효준 · 정승욱 · 한성민

Heon-sul Jeong, Ji-woo Nam, Hyo-joon Lim, Seung-wook Jung, Sung-min Han

**Key Words:** Static characteristics (정특성), Dynamic characteristics (동특성), Hysteresis (히스테리시스), First-stage proportional pressure control valve (1단 비례압력제어 밸브)

**Abstract:** Because of the increasing demand on the high precision and high response of a machinery, electronic control valves are widely adopted at various application fields. This paper studies on the static characteristic of a first-stage proportional pressure control valve. At first an experimental apparatus including hyd. pump variable speed inverter, pressure and data aquisition system was setted up with the experimental apparatus, various tests such as P-Q-W test, hyd, pump, dynamic, static, frequency response test of the proportional valve was carried out and the results are discussed.

### 1. 서론

각종 장치의 고정밀화 및 고응답성에 대한 요구의 증가로 인한 전자식 비례제어밸브의 수요 증대와 제어방식의 메카트로닉스화에도 불구하고, 비례제어 설계제조 기술의 미확보로 인해 수입의존도가 지속적으로 증가하고 선진업체의 지배적 시장구조의 고착화가 우려가 있어 기술자립화가 필요한 상황이다.

자동차, 공작기계, 전기제어장치, 화학·의학용기기 등 민수분야는 물론이고, 국방 및 항공우주 산업 분야에서 널리 쓰이는 비례 압력제어 밸브 (proportional pressure control valve)는 국가 전략 산업기술개발 사업으로써, (주)세원셀론텍과 공동으로 다단식 고응답 비례압력밸브 해석 및 제어기술 개발을 지난 2008년부터 시작하여 기술개발을 진행하고 있다.

비례제어밸브는 입력 전류신호에 비례한 압력

이나 유량을 연속적으로 조절할 수 있고, 직선성이 좋고 조작성이 우수하여 원격제어에 응용할 수 있다. 한편, On/Off 솔레노이드밸브에 의한 유압실린더나 모터의 속도나 방향을 조절할 때 서지 압력과 소음 진동이 수반되는데 비해, 비례 솔레노이드밸브를 사용한 회로는 이러한 단점이 없어 무충격 가감속 제어를 할 수 있으며, 개폐식 솔레노이드 밸브를 사용한 유압회로에 비해 회로 자체를 대폭 간략화 할 수 있기 때문에 시스템의 원가 절감을 도모할 수 있는 등 많은 장점을 지니고 있다.

본 연구에서는 개발대상 비례 압력제어밸브에 대하여 유압 실험 장치를 구성하고 그에 따른 특성 파악하기 위한 실험을 진행하였다.

### 2. 비례 압력제어밸브 구조

개발대상 비례 압력제어밸브는 다음 그림과 같이 1단(first-stage) 비례 압력제어밸브와 2단(second-stage) 압력제어밸브로 구성되며, 밸브의 설정압력은 비례앰프(proportional amplifier)에 의해 조절된다. 1단 비례밸브는 일반적으로 파일럿(pilot) 밸브 그리고 2단 밸브는 주(main) 밸브라고도 불리며, 본 연구에서는 파일럿밸브의 압력제어 특성에 집중해 실험을 수행하였다.

접수일: 2010년 6월 11일

정헌술(책임저자): 군산대학교 기계자동차공학부

E-mail: [hsjeong@kunsan.ac.kr](mailto:hsjeong@kunsan.ac.kr)

Mobile: 011-680-7147

남지우, 임효준, 정승욱: 군산대학교기계자동차공학부

한성민: (주)세원셀론텍 책임연구원

비례제어밸브 상단의 파일럿 밸브는 크게 좌측에 부착된 안전밸브(safety)와 나머지 압력릴리프 밸브로 구성되며, 압력릴리프밸브는 다시 압력조절용 원추형 포펫(poppet), 비례 솔레노이드와 코어 및 베어링 등으로 구성된다.

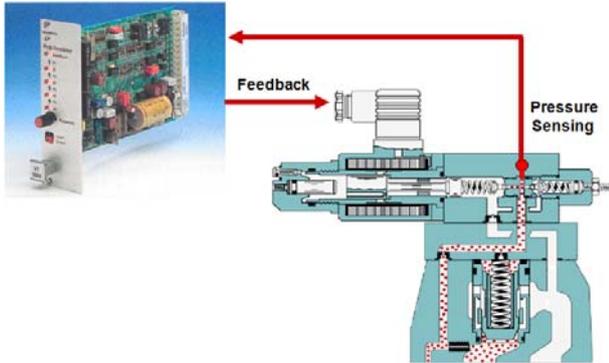


Fig. 1 Multi-stage proportional pressure control relief valve

여기서 안전밸브는, 비례 압력제어밸브가 유압 회로에 적용되어 운영되는 상황에서 발생할 수 있는 비정상적인 고압이 발생할 경우, 회로와 비례 밸브의 안전을 위해 최고압력을 제한하는 기능을 한다.

한편 압력릴리프밸브와 비례솔레노이드 부분의 상세 구조를 보면, 각각 다음 그림과 같다.

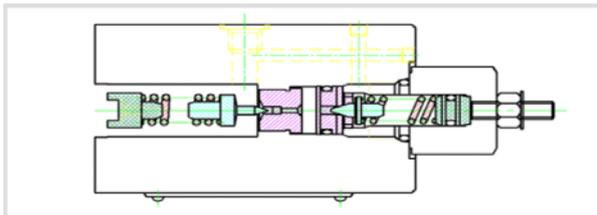


Fig. 2 Detail of the pilot pressure relief valve

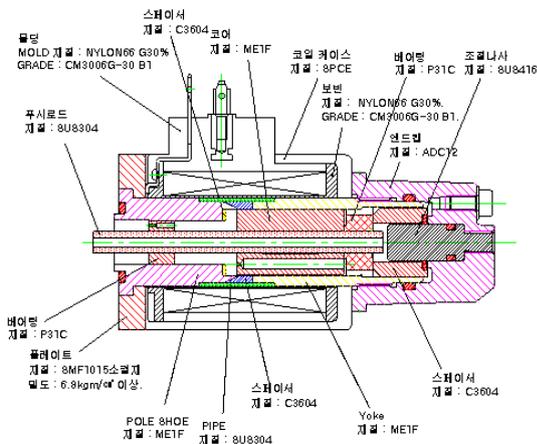


Fig. 3 Detail of the proportional solenoid

### 3. 유압제어시스템 실험장치 구성

유압제어시스템의 구성에 따른 특성을 실험하기 위해 다음 사진과 같은 실험장치를 구성하였다.



Photo. 1 유압제어시스템 특성시험장치

컴퓨터와 데이터획득장치(NI DAQ 6024E)를 사용해 터미널(SCB-68)을 거쳐 앰프(세원센텍, AMN-D-10)를 조작한다.

앰프(AMN-D-10)는 1단 비례 압력제어밸브의 솔레노이드에 전압을 인가시켜 압력을 제어한다. 한편, 컴퓨터와 데이터획득장치(NI DAQ 6024E)를 사용한 인버터(LS산전, SV\_i5) 제어를 통하여 3상 유도전동기(효성중공업, HICO 1800RPM)의 회전속도를 조작한다.

유압펌프는 3상 유도전동기(효성중공업, HICO 1800RPM)로 제어되며 이때 발생된 공급압력 및 유량은 릴리프 밸브(TOKIMEC, Relief Valve)를 통하여 설정한다. 펌프에서 공급하는 유량, 압력과 1단 비례 압력제어밸브로 들어가는 유량 및 압력은 유량센서(VSE, EF 0,04 ARO 14V PNP/2, EF 0,1 ARO 14V PNP/2)와 압력센서(Druck, PMP 1400)에 의해 측정되며 펌프의 입구 부분과 1단 비례 압력제어밸브의 입구에는 압력계가 장착되어 압력을 표시한다. 측정되어진 데이터 값은 인디케이터(SCI-501, TMI-010, LPI- 8522)에 표시

되며 터미널(SCB-68)을 통하여 데이터획득장치(NI DAQ 6024E)를 통하여 컴퓨터로 수집된다.

Table 1 실험장비 목록 정리 데이터

실험장비	모델명
Board	NI DAQ Card 6024E
Terminal	NATIONAL INSTRUMENT SCB-68
AMP	AMN-D-10 직류입력형 소비전력 25W, 0.2kg
Indicator	PARK ELECTRONICS SCI-501, AC 200V, 60Hz TMI-101, AC 200V, 60Hz LPI-8522, AC 200V, 50/60Hz
Inverter	LS Industrial System SV008iS5-2
3상 유도 전동기	효성중공업 HICO 20HP, 4극, 1750RPM, 60Hz, 160L
압력센서	Druck, PMP 1400 Pressure ranges 600bar
유량센서	VSE, EF 0,1 ARO 14V PNP/2 VSE, EF 0,04 ARO 14V PNP/2

**4. 유압펌프 특성 실험**

비례 압력제어밸브의 특성 실험 진행하기에 앞서 유량을 공급하는 펌프의 특성을 파악하기 위해 비례 압력제어밸브와 펌프의 연결부를 차단하고 실험을 실시하였다. 릴리프 밸브로 압력을 조정하고 인버터 입력전압으로 펌프속도를 조절하며 실험을 진행한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

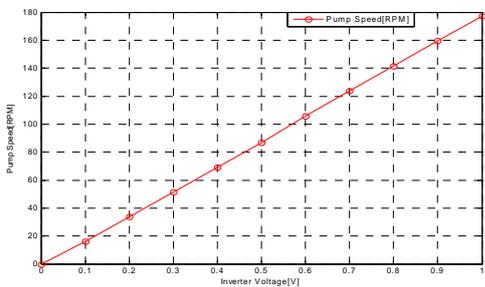


Fig. 4 Pump speed vs Inverter voltage

위 그래프에 따라 인버터 전압을 증가시켰을 때 펌프의 속도는 선형적으로 증가하게 됨을 알 수 있다. 이는 펌프의 속도와 인버터 전압의 관계를 알게 해 준다

릴리프 밸브의 펌프 공급 압력을 다음과 같이 유지하고 0bar, 50bar, 100bar, 160bar로 펌프속도를 증가시키에 따라 펌프유량의 변화를 관찰하였다.

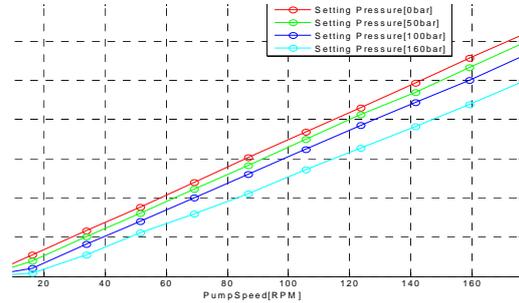


Fig. 5 Flow rate vs Pump speed

위 그래프를 살펴보면 선형적인 구간이 나타나는 것은 펌프속도가 20rpm을 넘어서는 순간이다. 이는 20rpm 이전 구간은 인버터 인가 전압의 영향을 받지 않으며 유량을 조절할 수 없다는 것을 의미한다.

한편, 펌프속도에 대한 펌프유량을 표현하는 그래프이므로 이 곡선으로 표현된 부분의 기울기가 펌프유량(LPM)/펌프속도(RPM)임을 알 수 있다. 이는 곧 위 그래프의 기울기가 배제용적임을 의미하며 압력이 배제용적에 미치는 영향을 파악하기 위해 기울기를 계산해 본 결과는 Table.1과 같이 정리해 보았다.

Table 2 릴리프 밸브 압력 설정에 따른 배제용적 비교

단위(L/rev)

압 력	0bar	50bar	100bar	160bar
기울기	1.0457	0.9959	0.9312	0.8160

다음은 펌프유량과 펌프속도 및 인버터 전압이 펌프압력에 미치는 영향을 파악하기 위해 아래와 같은 그래프를 그려 보았다.

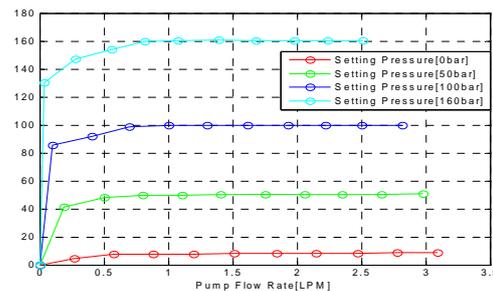


Fig. 6 Pump Flow Rate vs Pump Pressure

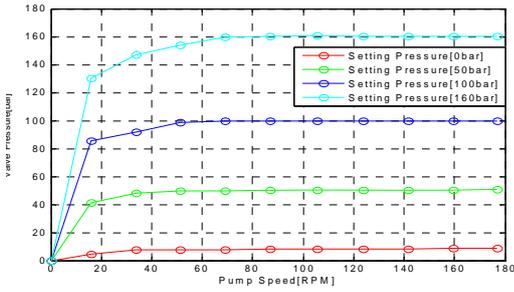


Fig. 7 Pump Speed vs Pump Pressure

### 5. 비례압력제어 밸브 정특성 실험

#### 5.1 입력전압-설정압력 특성 실험

릴리프 밸브의 설정압력( $P_R$ )을 각각의 실험에 대하여 50bar, 100bar, 160bar로 설정하고 비례압력제어밸브의 정격 유량인 2LPM으로 유지하기 위해 펌프속도를 일정하게 하였다. 그 후 0V~10V의 인가전압을 100초 동안 증가시킨 결과 유압시스템에서의 공급압력 특성은 다음과 같다.

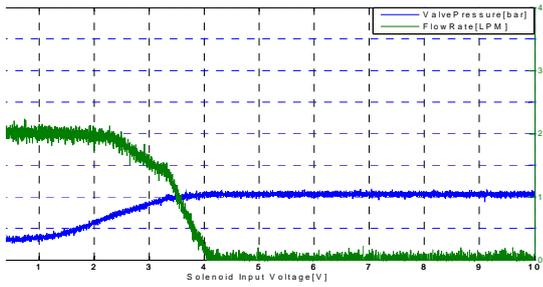


Fig. 8 Pressure vs Input voltage( $P_R=50bar$ )

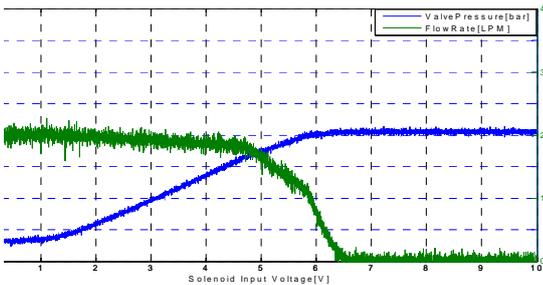


Fig. 9 Pressure vs Input voltage( $P_R=100bar$ )

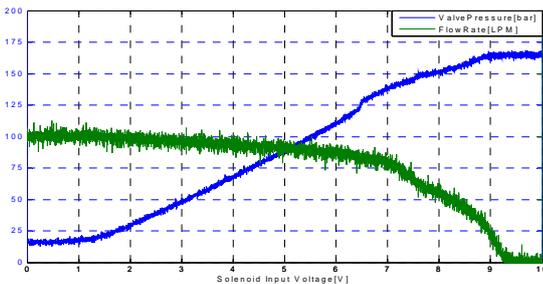


Fig. 10 Pressure vs Input voltage( $P_R=160bar$ )

위 그래프를 비교하여 보면 2V~6V 구간에서 우수한 선형성을 보이고 있다. 따라서 개발대상 비례 압력제어밸브는 이 구간이 가장 정밀도가 높은 구간임을 의미한다.

위의 3가지 그래프의 특성을 파악하여 보면 릴리프 밸브의 설정압력( $P_R$ )에 가까워지면 유량은 0LPM에 이르게 되는 현상을 볼 수 있다. 이러한 압력에 따른 유량의 변화를 파악하기 위해 다음과 같이 그래프를 그려 보았다.

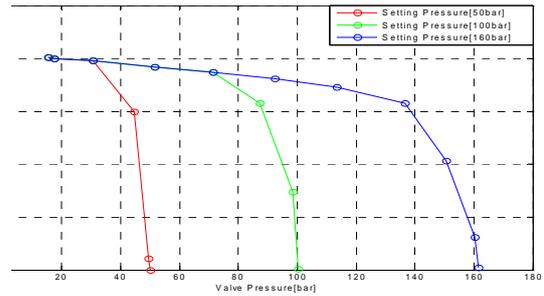


Fig. 11 Valve Pressure vs Flow Rate

다음은 릴리프 밸브의 설정압력( $P_R$ )을 160bar로 한 상태에서 펌프속도를 일정하게 유지하여 유량을 2LPM으로 조정하고 0V~10V의 인가전압을 100초 동안 계단입력으로 공급한 결과 압력 특성은 다음과 같다.

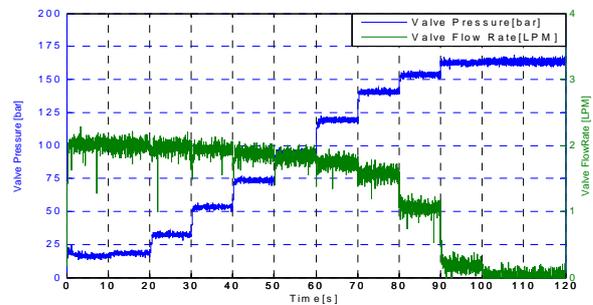


Fig. 12 Valve Pressure vs Time

Fig. 12의 그림으로 나타내어진 것이 시간에 대하여 전압 값을 일정하게 유지시키면서 순차적으로 전압을 올린 것이므로 실제적인 정특성 실험을 행한 것이다. 앞서 각각의 압력에 대하여 그려진 3개의 그래프는 엄밀히 따지자면 전압이 계속 바뀌는 것이지만 시간이 길다는 점 때문에 정특성 실험이라 아니라 준정특성 실험이라고 판단하여야 맞을 것이다. 따라서 계단입력으로 그려진 정특성 실험의 데이터의 평균값을 구하여 그래프를 그리고 위에 행하여진 준 정특성 실험과 비교하였다.

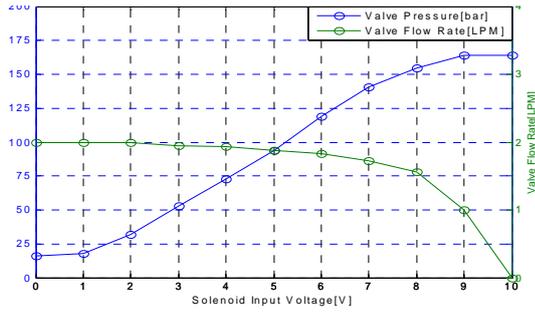


Fig. 13 Average Graph(Fig. 12)

위 그래프를 Fig. 13과 비교하면 밸브압력을 나타내는 곡선은 2V~6V의 선형성이 유지되는 구간이나 저전압 구간, 고전압 구간 모두에서 유사하다는 것을 알 수 있다. 다만 유량이 가장 적은 값을 나타내는 9V~10V 구간에서 0에 가까워지지 않는다는 점이 달랐다. 하지만 위의 두 자료를 비교해보면 큰 차이가 없다는 것을 알 수 있고 그에 따라 정특성 실험이 계단입력 뿐만 아니라 Fig와 같은 방법인 준정특성 실험으로 하여도 만족한다는 것을 보여준다.

5.2 통과유량-설정압력 특성 실험

릴리프 밸브의 압력을 160bar 조정하고 앰프 인가 전압을 0V, 2V, 4V, 6V, 8V, 10V로 각각 일정하게 유지한 상태에서 10초간 펌프속도를 일정하게 증가시키면 공급유량을 0LPM~2LPM 까지 증가시켰을 때, 다음과 같은 그래프 데이터를 얻을 수 있었다.

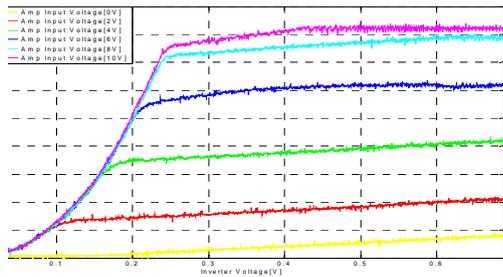


Fig. 14 Valve Pressure vs Inverter Voltage

위 그래프에서 살펴보면 모든 데이터 곡선이 유량이 증가함에 따라 압력이 증가하는 특성을 보인다. 하지만 인터버 전압입력 값이 0V~0.2V사이의 구간에서는 Amp Input Voltage 0V인 데이터 곡선을 제외한 모든 특성 곡선이 일치하는 구간을 가지게 됨을 볼 수 있었다. 이러한 특징에 따라 인터버 전압입력이 0V~0.2V인 구간은 개발 대상밸브의 압력제어가 미치지 않는 부분을 의미

한다.

6. 비례압력제어 동특성 실험

6.1 계단 전압입력에 따른 압력 응답 특성 실험

비례 압력제어밸브의 동적 응답성능을 파악하기 위한 실험을 진행하였다. 릴리프 밸브로 압력을 50bar, 100bar, 160bar로 각각 설정하고 펌프 속도를 일정하게 유지하여 유량을 2LPM으로 유지시킨 상태에서 솔레노이드에 인가되는 전압을 0V~4V, 0V~7V, 0V~10V로 변화시켰을 때 압력특성 곡선은 다음과 같다.

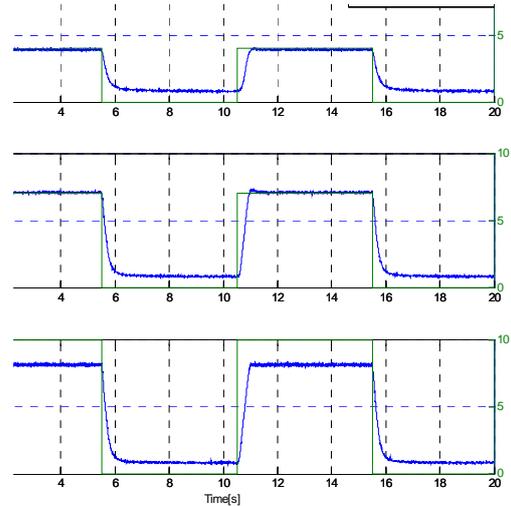


Fig. 15 Pressure regulating performance (0V~4V, 0V~7V, 0V~10V)

이번에는 0V에서 최대값의 범위가 아닌 중간 부분에서의 계단응답에 따른 특성을 파악하기 같은 조건에서 전압만 2V~8V, 3V~9V로 실험을 진행한 결과 다음과 같은 결과가 나왔다.

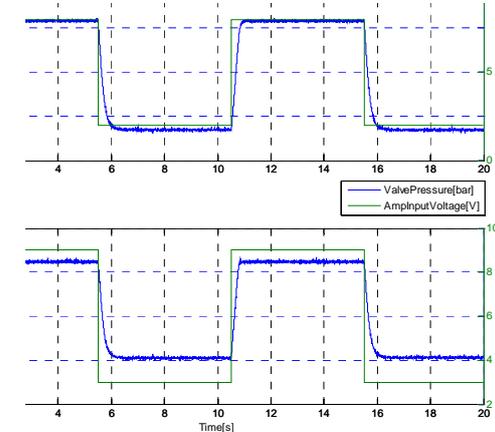


Fig. 16 Pressure regulating performance (2V~8V, 3V~9V)

위의 Fig. 19와 Fig. 20의 데이터를 바탕으로 각 전압 별로 Valve Pressure 값이 상승할 때와 하강할 때의 시간을 계산하여 아래와 같이 Table 4로 표현하여 보았다.

Table 3 계단입력전압에 따른 시간차 데이터

입력전압	시간차	
계단입력 0V~4V	상승시간	0.64(s)
	하강시간	1.61(s)
계단입력 0V~7V	상승시간	0.58(s)
	하강시간	1.72(s)
계단입력 0V~10V	상승시간	0.51(s)
	하강시간	1.8(s)
계단입력 2V~8V	상승시간	0.56(s)
	하강시간	1.12(s)
계단입력 3V~9V	상승시간	0.35(s)
	하강시간	1.14(s)

Table 3 에 따라 모든 계단입력 값의 상승시간이 하강 시간 보다 빠르다는 것을 볼 수 있다. 그래프를 통하여 보게 되면 전압이 상승할 때는 압력 값이 짧을 폭을 가지고 선형적으로 상승하지만 전압이 하강할 때는 최저 전압에 이르게 될 수록 곡선을 그리는 현상 때문에 이러한 시간차가 생기는 것이다.

6.2 계단 유량입력에 따른 압력 응답 특성 실험

위와 같은 동특성 실험으로 유량에 따른 압력의 변화를 알기 위하여 수행한다. 일단 릴리프 밸브의 압력은 160bar로 설정한 상태에서 밸브에 인가하는 전압을 각각 2V, 4V 6V, 8V로 일정하게 유지하며 유량은 0.5LPM~1.5LPM, 0LPM~2LPM으로 급격히 변경하였을 경우 시스템의 설정 압력특성의 결과는 다음과 같았다.

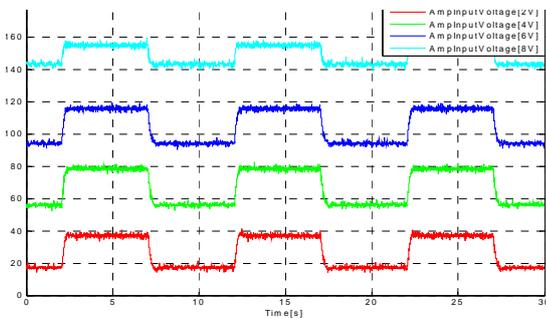


Fig. 17 Step response due to flow change (0.5LPM~1.5LPM)

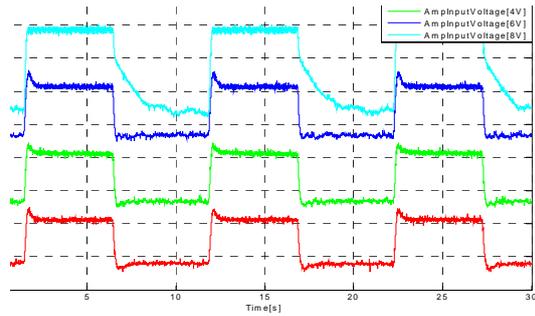


Fig. 18 Step response due to flow change (0LPM~2LPM)

두 그래프를 비교해 보면 Fig. 20 그래프는 전압과 계단입력유량에 따라 압력이 증가하는 것을 볼 수 있다. 하지만 Fig. 21 그래프는 8V 부분에서 압력의 변화가 크게 나타남을 알 수 있다. 또 오버슈트와 언더슈트가 나타나는 것으로 보아 유량이 급격히 높아짐에 일어나는 일시적인 초과 반응 현상이거나 반대로 일시적인 감소 상태라 할 수 있다.

6.3 주파수 응답 특성 실험

다음은 주파수 응답에 따라 시스템의 설정압력 변화의 폭을 파악하기 위해 밸브에 Sin파를 입력 전압으로 인가하고 0.1Hz, 0.5Hz, 1Hz, 2Hz의 진동을 주었다. 입력전압의 폭은 정특성 실험에서 선형으로 나온 구간인 2V~8V로 하고 유량은 밸브의 정격유량인 2LPM으로 실험을 진행한 결과 다음과 같은 그래프를 얻을 수 있었다.

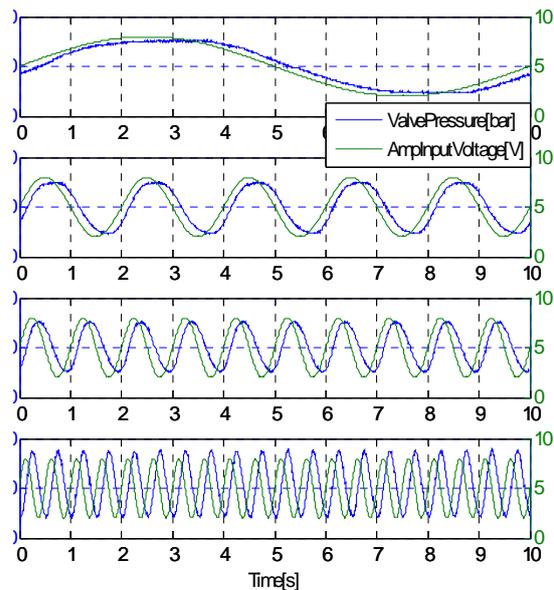


Fig. 19 Sin wave response due to frequency change

위의 4가지의 그래프를 보면 주파수의 변화에 따라 진폭, 주기 위상의 차이가 난다는 것은 알 수 있으나 실질적인 차이는 알 수 없으므로 계산을 통하여 다음과 같은 데이터를 산출 하였다.

Table 4 주파수에 따른 진폭, 평균압력, 위상변화

	0.1Hz	0.5Hz	1Hz	2Hz
진 폭	103	102	99.3	60
평균압력	99.66	100.14	102.27	103.47
위 상 차	12.24°	27°	36°	72°

위의 Table 2를 토대로 주파수가 증가함에 따라 진폭은 감소하지만 평균압력과 위상차는 증가함을 알 수 있다. 이는 진폭이 감소하여 압력이 폭이 적어지더라도 주파수 증가함에 따라 압력은 평균적으로 증가한다는 특성을 유출할 수 있다.

6.4 히스테리시스특성 실험

릴리프 밸브 설정전압(P<sub>R</sub>)을 160bar로 하고 Amp Input Voltage를 0V~10V로 인가하면서 시간의 폭을 3초 단위로 Voltage를 올렸다 내렸다하며 반복 시험을 하였다

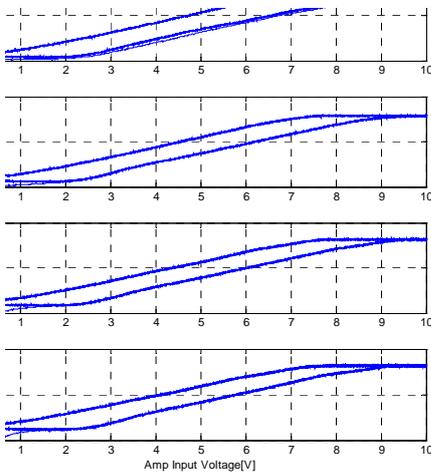


Fig. 20 Hysteresis Characteristic experiment (Change of flowrate)

위에서부터 0.5LPM, 1LPM, 1.5LPM, 2LPM 순으로 유량만을 변화시켜 본 결과 히스테리시스는 26.2%, 25.1%, 24.1%, 25.4% 전체적으로 1%~2% 차이의 변화를 보였다. 따라서 이번에는 위 실험과 같은 전압을 유지하고 시간의 폭을 10s, 20s, 40s로 변화시켜 본 결과 다음과 같다.

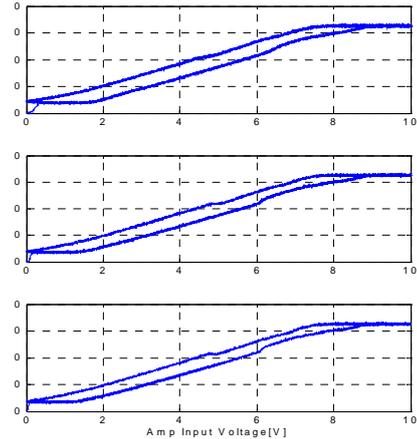


Fig. 21 Hysteresis Characteristic experiment (Change of time range)

히스테리시스의 값이 16.4%, 15.4%, 13.1%로 유량을 변경하였을 때보다 적은 값이 나오는 것으로 보아 유량 보다는 시간의 폭에 더 큰 영향이 받는다는 것을 알 수 있다.

7. 결론

본 논문에서는 현재 개발 단계에 있는 비례 압력제어밸브의 압력제어특성을 알아보기 위해 장비를 구축하고 정특성 및 동특성의 실험을 진행 하였다. 그 결과 정특성 관련 실험에서 비례 압력제어밸브의 정밀도를 가장 잘 이끌어 낼 수 있는 구간이 2V~8V 구간이라는 것을 알게 되었고 1V~2V 구간은 밸브의 압력제어가 미치지 못 하는 것을 판단 할 수 있었다. 이를 바탕으로 동특성 실험은 전압의 범위를 2V~8V 위주로 진행하였다.

결론적인 내용은 비례 압력제어밸브의 압력제어에 영향을 주는 요인은 대표적으로 전압과 유량이 있지만 미흡하지만 주파수도 압력에 영향을 줄 수 있는 요인이라는 것을 알 수 있다.

참고 문헌

- 1) 정헌술, “다단식 고응답 비례압력밸브 해석, 제어기술 개발, 전략 산업 기술개발 사업, 연차보고서,” (주)세원셀론텍, 2008.
- 2) 機械設計圖表便覽, 改新增補 5版, 大光書林, 11-1 ~ 11-9.
- 3) SV\_iS5 Inverter Manual 4장(4-1 ~ 4-29.)
- 4) AMP(AMN-D-10) Manual(3절, 4절, 5절)